



⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 199 28 226 A 1**

⑤ Int. Cl. 7:  
**G 10 K 11/178**  
F 23 R 3/42  
F 23 C 11/04

⑲ Aktenzeichen: 199 28 226.9  
⑳ Anmeldetag: 7. 5. 1999  
㉔ Offenlegungstag: 1. 2. 2001

DE 199 28 226 A 1

⑦① Anmelder:  
ABB ALSTOM POWER (Schweiz) AG, Baden,  
Aargau, CH  
  
⑦④ Vertreter:  
Lück, G., Dipl.-Ing. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 79761  
Waldshut-Tiengen

⑦② Erfinder:  
Paschereit, Christian Oliver, Dr., Baden, CH;  
Weisenstein, Wolfgang, Remetschwil, CH;  
Gutmark, Ephraim, Prof., Baton Rouge, La., US

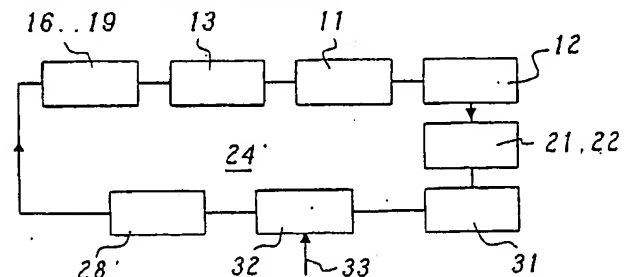
⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:

DE 31 44 052 C2  
DE 41 30 559 A1

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤④ Verfahren zur Unterdrückung bzw. Kontrolle von thermoakustischen Schwingungen in einem  
Verbrennungs-System sowie Verbrennungssystem zur Durchführung des Verfahrens

⑤⑦ Bei einem Verfahren zur Unterdrückung bzw. Kontrolle  
von thermoakustischen Schwingungen, welche in einem  
Verbrennungssystem mit einem in eine Brennkammer  
(12) arbeitenden Brenner (11) durch Ausbildung kohären-  
ter bzw. Wirbelstrukturen und einer damit verbundenen  
periodischen Wärmefreisetzung entstehen, bei welchem  
Verfahren in einer geschlossenen Regelschleife (24') die  
Schwingungen detektiert und in Abhängigkeit von den  
detektierten Schwingungen akustische Schwingungen einer  
bestimmten Amplitude und Phase erzeugt und in das  
Verbrennungssystem (10) eingekoppelt werden, wird  
eine verbesserte Unterdrückung dadurch erreicht, daß in-  
nerhalb der Regelschleife (24') die Amplitude der erzeug-  
ten akustischen Schwingungen proportional zur Amplitu-  
de der detektierten Schwingungen gewählt wird.



DE 199 28 226 A 1

## TECHNISCHES GEBIET

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Verbrennungstechnik, wie sie insbesondere für Gasturbinen eine Rolle spielt. Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Unterdrückung bzw. Kontrolle von thermoakustischen Schwingungen in einem Verbrennungssystem gemäss dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verbrennungssystem zur Durchführung des Verfahrens gemäss dem Oberbegriff des Anspruchs 8.

Ein derartiges Verfahren bzw. Verbrennungssystem ist beispielsweise aus dem Artikel von Paschereit, C. O., Gutmark, E., und Weisenstein, W., "Structure and Control of Thermoacoustic Instabilities in a Gas-Turbine Combustor", 36<sup>th</sup> AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, January 12-15, 1998, bekannt.

## STAND DER TECHNIK

Thermoakustische Schwingungen stellen eine Gefahr für jede Art von Verbrennungsanwendungen bzw. -systemen dar. Sie führen zu Druckschwingungen hoher Amplitude, zu einer Einschränkung des Betriebsbereiches, und können die unerwünschten Schadstoffemissionen erhöhen. Dies trifft insbesondere für Verbrennungssysteme mit geringer akustischer Dämpfung zu, wie sie üblicherweise bei Gasturbinen vorliegen. Um im Bezug auf Pulsationen und Emissionen eine hohe Leistungskonversion über einen weiten Betriebsbereich zu ermöglichen, kann eine aktive Kontrolle bzw. Unterdrückung der Verbrennungsschwingungen notwendig sein.

In der Vergangenheit sind bereits verschiedene aktive Kontrollsysteme vorgeschlagen worden, die nach dem Prinzip des "Antischalls" arbeiten, d. h., die thermoakustischen Schwingungen werden detektiert, in der Phase um 180 Grad gedreht und in entsprechend verstärkter Form in das System eingekoppelt, um aufgrund dann bei Überlagerung mit den thermoakustischen Schwingungen aufgrund der Gegenphasigkeit zu einer Auslöschung zu führen. Die Antischall-Lösungen haben sich bei Verbrennungssystemen geringer Leistung als brauchbar erwiesen. Bei Verbrennungssystemen hoher Leistung mit entsprechend starken Druckschwankungen wird es jedoch zunehmend schwierig, entsprechende akustische Schwingungen mit vertretbarem Aufwand zu erzeugen und einzukoppeln.

Um auch bei hohen Leistungen eine aktive Kontrolle zu ermöglichen, hat man deshalb vorgeschlagen, entweder die Brennerflamme selbst über die Brennstoffzufuhr in Abhängigkeit von den detektierten Instabilitäten zu modulieren (US-A-5,145,355), oder einen Schwingungserzeuger in Form eines pulsierend betriebenen Hilfsbrenners einzuführen (US-A-5,428,951). In beiden Fällen können so über gezielt erzeugte Schwankungen in der Wärmefreisetzung die gewünschten akustischen Schwingungen hoher Leistung erzeugt werden. Nachteilig ist dabei jedoch, dass diese Art der Schwingungserzeugung massive Eingriffe in das Verbrennungssystem erfordert und daher beispielsweise bei vorhandenen Konstruktionen nicht ohne weiteres nachgerüstet werden kann. Darüber hinaus lässt sich ein solches System wegen der Komplexität der dabei ins Spiel kommenden Verbrennungsvorgänge nur schwer über einen grösseren Betriebsbereich gezielt und stabil beeinflussen und regeln.

In der eingangs genannten Druckschrift ist nun eine aktive Kontrolle der thermoakustischen Schwingungen vorgeschlagen worden, die nicht auf der Schallauslöschung be-

ruht, sondern in die Entstehung der Schwingungen eingreift und wie folgt beschrieben werden kann: Kohärente Strukturen spielen eine entscheidende Rolle bei Mischungsvorgängen zwischen Luft und Brennstoff. Die Dynamik dieser Strukturen beeinflusst demzufolge die Verbrennung und damit die Wärmefreisetzung. Durch Beeinflussung der Scherschicht zwischen dem Frischgasgemisch und dem rezirkulierten Abgas ist eine Kontrolle der Verbrennungsinstabilitäten möglich. Eine Möglichkeit der Beeinflussung ist die in der eingangs genannten Druckschrift beschriebene akustische Anregung. Die akustische Anregung erlaubt eine Unterdrückung der verbrennungsgetriebenen Schwingungen, indem sie die Ausbildung kohärenter Strukturen verhindert. Durch die Verhinderung der Entstehung von Wirbelstrukturen am Brenneraustritt wird eine periodische Wärmefreisetzung und damit die Grundlage für das Auftreten thermoakustischer Schwingungen unterbunden.

Anders als beim Prinzip des Antischalls, bei dem ein vorhandenes Schallfeld durch Einbringen eines phasenverschobenen Schallfeldes gleicher Energie ausgelöscht wird, basiert diese Methode auf der direkten Beeinflussung der Scherschicht. Diese direkte Beeinflussung der Scherschicht hat den Vorteil, dass die von aussen eingebrachten Störungen in der Scherschicht selbst verstärkt werden und daher weniger Energie zur Erzeugung der Störungen benötigt wird als im Fall der direkten Auslöschung eines Schallfeldes durch Antischall. Die Scherschicht kann dabei sowohl stromab als auch stromauf des Brenners angeregt werden. Da nur geringe Leistungen notwendig sind, kann die Schallenergie z. B. von akustischen Treibern, insbesondere Lautsprechern oder dgl., in die Strömung eingebracht werden. Durch Wahl der korrekten Phasendifferenz zwischen Pulsation und akustischem Anregungssignal kann die Kohärenz der sich entwickelnden Instabilitätswellen gestört und können die Pulsationsamplituden verringert werden.

Ein beispielhaftes Verbrennungssystem, wie es in der eingangs genannten Druckschrift verwendet worden ist und sich auch für die vorliegende Erfindung eignet, ist schematisch in Fig. 1 wiedergegeben. Das Verbrennungssystem 10 umfasst einen (drallstabilisierten) Brenner 11, der in einer Brennkammer 12 arbeitet. Der Brenner 11 erhält die notwendige Verbrennungsluft über eine Luftzuführung 13. Für die Brennstoffversorgung ist eine entsprechende Brennstoffzuführung 14 vorgesehen. Zur Detektion der thermoakustischen Schwingungen, die im Bereich der Flamme 15 entstehen, sind Sensoren 20, ..., 22 vorgesehen, die an der Luftzuführung (Sensoren 20) und/oder an der Brennkammer (Sensoren 21, 22) angeordnet sein können. Die Sensoren 20, ..., 22 können zur direkten Detektion der Druckschwankungen bzw. -schwingungen als (wassergekühlte) Mikrophone oder andere dynamische Druckaufnehmer ausgebildet sein. Die Sensoren 20, ..., 22 können aber auch ganz oder teilweise als optische Sensoren ausgebildet sein, mit denen über die Chemilumineszenz z. B. der OH-Moleküle die Schwankungen in der Wärmefreisetzung detektiert werden können, die mit den thermoakustischen Schwingungen direkt verknüpft sind.

Die Sensoren 20, ..., 22 sind an eine Regelung 23 angeschlossen, die ausgangsseitig verschiedene Lautsprecher 16, ..., 19 ansteuert, die symmetrisch zur Achse des Verbrennungssystems 10 wahlweise im Bereich der Luftzuführung 13 und/oder der Brennkammer 12 angeordnet sind. Die Lautsprecher 16, ..., 19 erzeugen nach Massgabe der Regelung 23 akustische Schwingungen, die dann in das Verbrennungssystem 10 eingekoppelt werden und dort die beschriebenen Scherschichten beeinflussen. Das Verbrennungssystem 10 nach dem Stand der Technik mit den Sensoren 20, ..., 22 und den Lautsprechern 16, ..., 19 bildet - wenn die

Schwingungen an der Brennkammer 12 detektiert werden – die in Fig. 2 dargestellte geschlossene Regelschleife 24. Die von den Sensoren 21 und/oder 22 detektierten Schwingungen in der Brennkammer 12 werden in einem nachfolgenden Filter 25 gefiltert und ggf. verstärkt und anschliessend mittels eines Phasenschiebers 26 mit vorgebbbarer Phaseinstellung 29 in der Phase um einen gewünschten Betrag verschoben. Das phasenverschobene Signal triggert dann einen Signalgenerator 27, dessen Ausgangssignal in einem Leistungsverstärker 28 mit vorgebbbarer Amplitudeneinstellung 30 verstärkt und zum Ansteuern der Lautsprecher 16, . . . 19 verwendet wird. Mit dieser bekannten Regelung, bei der die akustischen Schwingungen synthetisch erzeugt werden und die Amplitude dieser Schwingungen fest eingestellt ist, ist bei dem verwendeten System bereits eine Unterdrückung (Schwächung) der verbrennungsgetriebenen Schwingungen um bis zu 6 dB erreicht worden.

Es wäre jedoch wünschenswert, mit einer Anordnung gemäss Fig. 1 eine noch bessere Unterdrückung zu erreichen.

#### DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren der akustischen Kontrolle thermoakustischer Schwingungen anzugeben, welches unter Einsatz des Prinzips der akustischen Anregung der Scherschicht eine deutlich verbesserte Unterdrückung ermöglicht, sowie ein Verbrennungssystem zur Durchführung eines solchen Verfahrens anzugeben.

Die Aufgabe wird durch die Gesamtheit der Merkmale der Ansprüche 1 und 8 gelöst. Der Kern der Erfindung besteht darin, innerhalb der geschlossenen Regelschleife, die durch das Verbrennungssystem mit den Sensoren und akustischen Anregungsmitteln (z. B. Lautsprechern) gebildet wird, eine proportionale Regelung vorzusehen, d. h., die Amplitude der erzeugten akustischen Schwingungen direkt proportional zur Amplitude der detektierten Schwingungen auszusteuern. Durch die proportionale Regelung ergeben sich überraschenderweise Werte für die Unterdrückung, die bei einem System gemäss Fig. 1 bis zu 20 dB betragen können.

Eine bevorzugte Ausführungsform des Verfahrens nach der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass zur Detektion der thermoakustischen Schwingungen entweder die damit verbundenen Druckschwankungen akustisch gemessen werden, oder die damit verbundenen Schwankungen in der Wärmefreisetzung optisch gemessen werden, wobei zur optischen Messung der Schwankungen in der Wärmefreisetzung insbesondere die Schwankungen in der Chemilumineszenz der OH-Moleküle gemessen werden.

Eine andere bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemässen Verfahrens zeichnet sich dadurch aus, dass zur Erzeugung der akustischen Schwingungen Lautsprecher verwendet werden, welche akustisch an das Verbrennungssystem angekoppelt sind.

Die im erfindungsgemässen Verbrennungssystem verwendeten Sensoren können gemäss einer bevorzugten Ausführungsform entweder als Druckschwankungen aufnehmende Drucksensoren, insbesondere als Mikrophon, ausgebildet sein, oder als optische Sensoren zur Messung der Chemilumineszenz.

Weitere Ausführungsformen ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

#### KURZE ERLÄUTERUNG DER FIGUREN

Die Erfindung soll nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit der Zeichnung näher erläutert werden. Es zeigen

Fig. 1 die schematische Darstellung eines Verbrennungssystems mit akustischer Kontrolle der thermoakustischen Schwingungen nach dem Stand der Technik, wie es beispielsweise auch zur Realisierung der vorliegenden Erfindung eingesetzt werden kann;

Fig. 2 das aus dem Stand der Technik bekannte Regelschema des Systems nach Fig. 1;

Fig. 3 ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel eines Regelschemas für das System nach Fig. 1, wie es bei dem Verfahren nach der Erfindung Anwendung findet; und

Fig. 4 beispielhafte Messkurven, welche die Unterdrückung einer Druckschwingung im 100 Hz-Bereich in einem System nach Fig. 1 mit einem Regelschema gemäss Fig. 3 zeigen.

#### WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

In Fig. 3 ist ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel eines Regelschemas wiedergegeben, das im Rahmen der Erfindung anstelle des aus dem Stand der Technik bekannten Regelschemas (Fig. 2) in einem Verbrennungssystem nach Fig. 1 eingesetzt werden kann, um eine verbesserte Unterdrückung der thermoakustischen Schwingungen zu erreichen. Bei der geschlossenen Regelschleife mit Proportionalregelung werden in Abweichung zu Fig. 2 die von den Sensoren 21, 22 abgegebenen, für die thermoakustischen Schwingungen charakteristischen Detektionssignale an einen P-Regler 31 weitergegeben, der die Signale verstärkt und um eine vorgegebene Zeitspanne verzögert. Die Verzögerung – die der Phasenverschiebung in Fig. 2 entspricht – kann dabei direkt im P-Regler 31 erfolgen, oder – wie in Fig. 3 gezeigt – in einer nachgeschalteten Verzögerungsschaltung 32 mit Verzögerungszeiteinstellung 33. Das vorverstärkte, verzögerte Signal wird dann direkt auf den Eingang eines Leistungsverstärkers 28' gegeben, der es auf das für die Ansteuerung der Lautsprecher 16, . . . 19 erforderliche Leistungsniveau verstärkt. Die Proportionalregelung bewirkt, dass die Amplitude der erzeugten akustischen Schwingungen mit der Amplitude der detektierten Verbrennungsschwingungen proportional steigt und fällt. Diese direkte regeltechnische Verknüpfung der beiden Schwingungen führt nun überraschenderweise dazu, dass sich eine wesentlich bessere Unterdrückung der Verbrennungsschwingungen ergibt.

In Fig. 4 sind beispielhafte Messergebnisse aufgetragen, welche die Unterdrückung (in dB) einer Druckschwingung im 100 Hz-Bereich in einem Verbrennungssystem gemäss Fig. 1 mit einer Proportionalregelung gemäss Fig. 3 zeigen. Dargestellt sind dabei die normierten Amplituden als Funktion der Phasenverschiebung (in Grad) zwischen den detektierten und erzeugten Schwingungen für die akustische Detektion mittels Mikrophon (offene Kreise) und die optische Detektion über OH-Chemilumineszenz (gefüllte Kreise). Man erkennt, dass sich in beiden Fällen annähernd gleich die maximale Unterdrückung von mehr als 20 dB bei einer Phasenverschiebung von etwa 50 Grad ergibt.

Es versteht sich von selbst, dass die notwendige optimale Zeitverzögerung bzw. Phasenverschiebung vom jeweiligen Verbrennungssystem abhängig ist. Bedeutsam ist in jedem Fall, dass die akustischen Schwingungen mit einer Leistung erzeugt und eingekoppelt werden können, die mehrere Zehnerpotenzen kleiner ist als die thermische Leistung des Verbrennungssystems. Von den akustischen Anregungsmitteln (Lautsprechern 16, . . . 19) ist zu fordern, dass sie – wenn es sich bei dem Verbrennungssystem 10 um das einer Gasturbine handelt – den in Gasturbinen üblichen Vorheiztemperaturen von ca. 400°C standhalten müssen. Weiterhin sollten sie ca. 0.001% der thermischen Leistung pro Brenner 11 (bei

mehreren Brennern) an das jeweilige Gas (Luft oder Frischgemisch bei Anregung stromauf; Abgas bei Anregung stromab des Brenners 11) abgeben können.

## BEZUGSZEICHENLISTE

- 10 Verbrennungssystem
- 11 Brenner (drallstabilisiert)
- 12 Brennkammer
- 13 Luftzuführung
- 14 Brennstoffzuführung
- 15 Flamme
- 16, ... 19 Lautsprecher
- 20 Sensor (Luftzuführung)
- 21, 22 Sensor (Brennkammer)
- 23 Regelung
- 24, 24' Regelschleife
- 25 Filter
- 26 Phasenschieber
- 27 Signalgenerator
- 28, 28' Leistungsverstärker
- 29 Phaseinstellung
- 30 Amplitudeneinstellung
- 31 P-Regler
- 32 Verzögerungsschaltung
- 33 Verzögerungszeiteinstellung

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Unterdrückung bzw. Kontrolle von thermoakustischen Schwingungen, welche in einem Verbrennungssystem (10) mit einem in einer Brennkammer (12) arbeitenden Brenner (11) durch Ausbildung kohärenter bzw. Wirbelstrukturen und einer damit verbundenen periodischen Wärmefreisetzung entstehen, bei welchem Verfahren in einer geschlossenen Regelschleife (24') die Schwingungen detektiert und in Abhängigkeit von den detektierten Schwingungen akustische Schwingungen einer bestimmten Amplitude und Phase erzeugt und in das Verbrennungssystem (10) eingekoppelt werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass innerhalb der Regelschleife (24') die Amplitude der erzeugten akustischen Schwingungen proportional zur Amplitude der detektierten Schwingungen gewählt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur Detektion der thermoakustischen Schwingungen die damit verbundenen Druckschwankungen akustisch gemessen werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur Detektion der thermoakustischen Schwingungen die damit verbundenen Schwankungen in der Wärmefreisetzung optisch gemessen werden.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass zur optischen Messung der Schwankungen in der Wärmefreisetzung die Schwankungen in der Chemilumineszenz der OH-Moleküle gemessen werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erzeugung der akustischen Schwingungen Lautsprecher (16, ... 19) verwendet werden, welche akustisch an das Verbrennungssystem (10) angekoppelt sind.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die akustischen Schwingungen mit einer Leistung erzeugt und eingekoppelt werden, die mehrere Zehnerpotenzen kleiner ist als die thermische Leistung des Verbrennungssystems (10).
7. Verbrennungssystem zur Durchführung des Verfah-

rens nach Anspruch 1, welches Verbrennungssystem (10) einen Brenner (11), eine Brennkammer (12), eine Luftzuführung (13) für die Zuführung von Verbrennungsluft zum Brenner (11), wenigstens einen Sensor (20, ... 22) zur Detektion der thermoakustischen Schwingungen sowie Mittel (16, ... 19) zur Erzeugung und Einkopplung der akustischen Schwingungen in das Verbrennungssystem (10) umfasst, wobei der wenigstens eine Sensor (20, ... 22) und die Mittel (16, ... 19) zur Erzeugung und Einkopplung der akustischen Schwingungen in einer geschlossenen Regelschleife (24') angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, dass in der Regelschleife (24') zwischen dem wenigstens einen Sensor (20, ... 22) und den Mitteln (16, ... 19) zur Erzeugung und Einkopplung der akustischen Schwingungen ein P-Regler (31) vorgesehen ist.

8. Verbrennungssystem nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der wenigstens eine Sensor (21) als ein Druckschwankungen aufnehmender Drucksensor, insbesondere als Mikrophon, ausgebildet ist.

9. Verbrennungssystem nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der wenigstens eine Sensor (22) optischer Sensor zur Messung der Chemilumineszenz ausgebildet ist.

10. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zur Erzeugung und Einkopplung der akustischen Schwingungen als Lautsprecher (16, ... 19) ausgebildet sind.

11. Verbrennungssystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass innerhalb der Regelschleife (24') dem P-Regler (31) ein Leistungsverstärker (28') nachgeschaltet ist, welcher die Lautsprecher (16, ... 19) ansteuert.

12. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 7 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass in der Regelschleife (24') vor den Mitteln zur Erzeugung und Einkopplung der akustischen Schwingungen bzw. vor den Lautsprechern (16, ... 19) Mittel (32) zur einstellbaren zeitlichen Verzögerung des Regelsignals vorgesehen sind.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

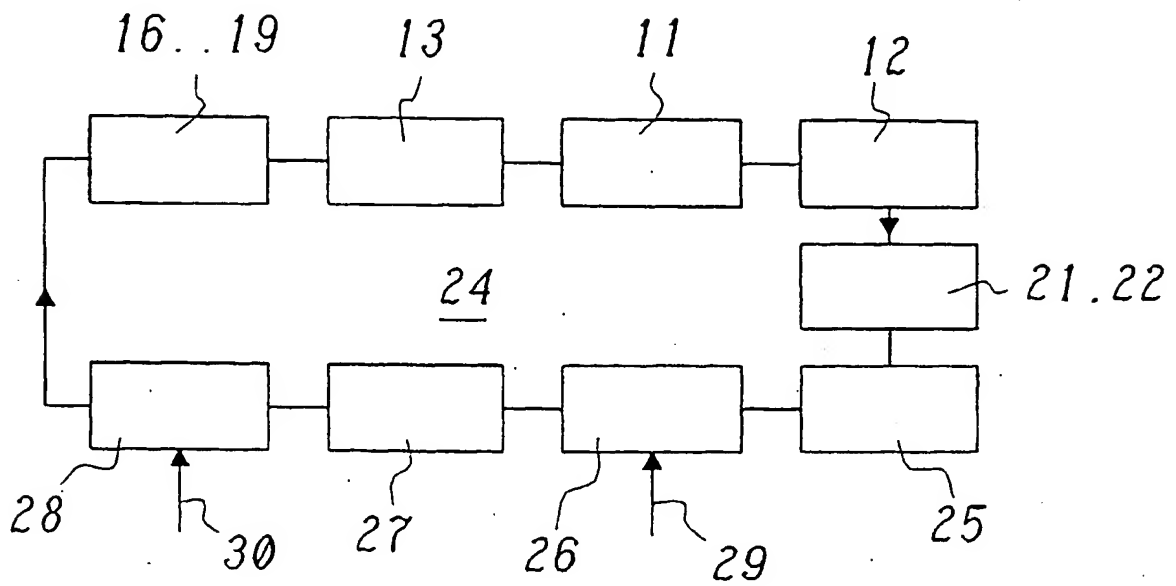


Fig. 2

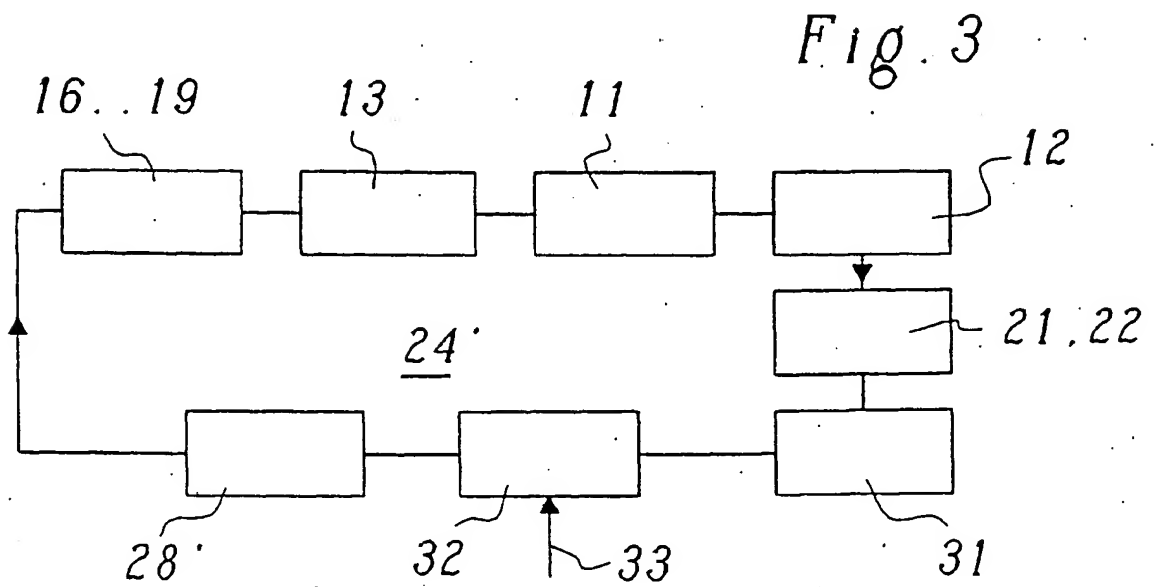


Fig. 3

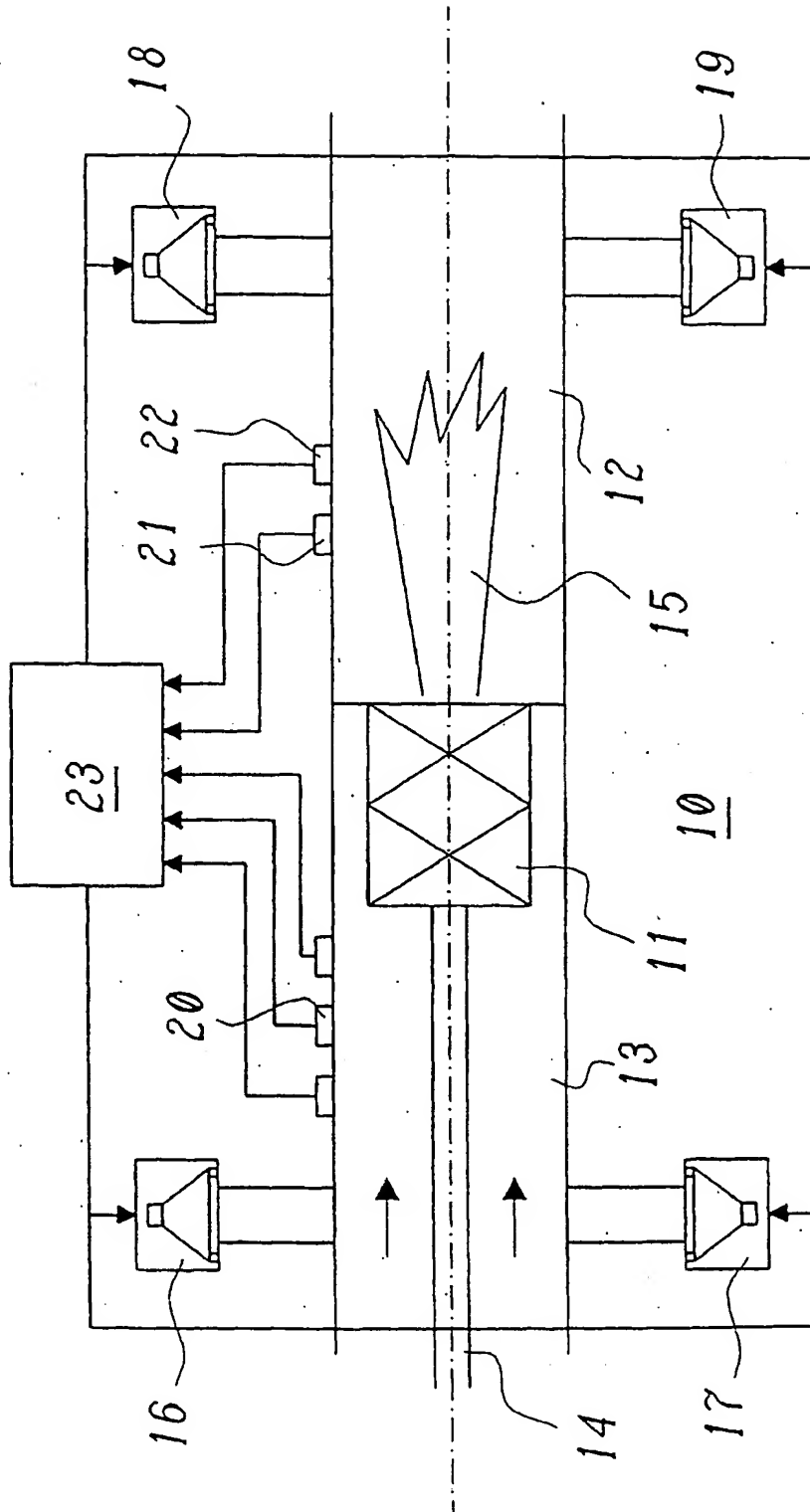


Fig. 1

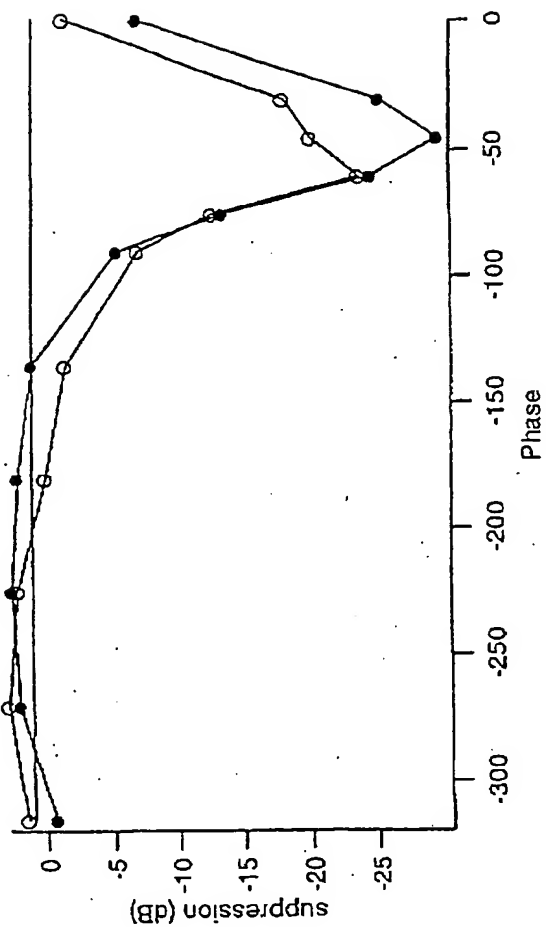


Fig. 4